太阳能杀虫灯物联网节点的防盗防破坏设计及展望

黄 凯[1,2]，舒 磊[2,3*]，李凯亮[2]，杨 星[2]，朱 艳[1]，汪小旵[4]，苏 勤[2]

（1. 国家信息农业工程技术中心，江苏南京 210095；2. 南京农业大学 人工智能学院，江苏南京 210031；
3. 英国林肯大学，林肯 LN67TS；4. 南京农业大学 工学院，江苏南京 210031）

摘 要：太阳能杀虫灯在有效控制虫害的同时，可减少农药施药量。随着其部署数量的增加，被盗被破坏的报道也越来越多，严重影响了虫害防治效果并造成了较大的经济损失。为有效地解决太阳能杀虫灯物联网节点被盗被破坏问题，本研究以太阳能杀虫灯物联网为应用场景，对太阳能杀虫灯硬件进行改造设计以获取更多的传感信息；提出了太阳能杀虫灯辅助设备——无人机杀虫灯，用以被盗被破坏出现后的部署、追踪和巡检等应急应用。通过上述硬件层面的改造设计和增加辅助设备，可以获取更为全面的信息以判断太阳能杀虫灯物联网节点被盗被破坏情况。但考虑到被盗被破坏发生时间短，仅改造硬件层面还不足以实现快速准确判断。因此，本研究进一步从内部硬件、软件算法和外形结构设计三个层面，探讨了设备防盗防破坏的优化设计、设备防盗防破坏判断规则的建立、设备被盗被破坏的快速准确判断、设备被盗被破坏的应急措施、设备被盗被破坏的预测与防控，以及优化计算以降低网络数据传输负荷六个关键研究问题，并对设备防盗防破坏技术在太阳能杀虫灯物联网场景中的应用进行了展望。

关键词：太阳能杀虫灯；防盗防破坏；无人机杀虫灯；农业物联网；节点

中图分类号：S237;S251;U492.8+3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202102-SA034

引用格式：黄凯，舒磊，李凯亮，杨星，朱艳，汪小旵，苏勤．太阳能杀虫灯物联网节点的防盗防破坏设计及展望[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3 (1): 129-143.

HUANG Kai, SHU Lei, LI Kailiang, YANG Xing, ZHU Yan, WANG Xiaochan, SU Qin. Design and prospect for anti-theft and anti-destruction of nodes in Solar Insecticidal Lamps Internet of Things[J]. Smart Agriculture, 2021, 3 (1): 129-143. (in Chinese with English abstract)

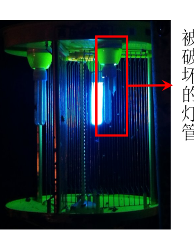
1 太阳能杀虫灯被盗被破坏现状

目前，太阳能杀虫灯在农业中得到了广泛应用[1]，有效减少了大田期成虫落卵量及后期化肥农药施用量，并能进行虫情监测，确保粮食安全。但是，越来越多的研究和报道表明，太阳能杀虫灯被盗被破坏非常严重（如图1所示）。

整理涉及到杀虫灯盗窃破坏的文献、报道如表1所示。分析太阳能杀虫灯各零部件被盗被破坏的情况主要原因如下。



(a)杀虫灯整灯被盗留下的底座



(b)被破坏的杀虫灯灯管

图1 杀虫灯被盗被破坏情况[2]

Fig. 1 Theft and destruction of solar insecticidal lamp

收稿日期：2021-02-16　修订日期：2021-03-11

基金项目：国家自然科学基金（62072248）

作者简介：黄 凯（1988—），男，博士，研究方向为农业物联网。E-mail：kai_huang@njau.edu.cn。

*通讯作者：舒 磊（1981—），男，博士，教授，研究方向为农业物联网。电话：025-58606643。E-mail：lei.shu@njau.edu.cn。

（1）太阳能杀虫灯价值较高。目前网上检索到的255个太阳能杀虫灯产品，均价为2039.5元人民币（220.0～20,000.0元）[23]。

（2）监视设备投入高。太阳能杀虫灯往往部署在人流量较少的地方，通过增加摄像头等监视设备来保障设备安全会大幅增加硬件投入，提升成本，不利于设备推广应用，同时监测设备本身也存在被盗被破坏的风险[24]。

（3）监视设备通讯功能不完善。已有的太阳能杀虫灯防盗功能大都是通过GPRS模块实现的[1]，但这只适用于图1（a）所示的整灯被盗，且被盗灯具功能完好[2]的情况，不适用零部件的盗窃及破坏等情况，且其产生的数据流量费用使得应用成本持续增加。

（4）太阳能杀虫灯管理不完善。当太阳能杀虫灯节点被盗被破坏后，缺乏应急措施去管理维护杀虫灯，短时间内无法恢复，这容易引起更多的被盗被破坏问题。

综上，太阳能杀虫灯在应用过程中，缺乏合适的防盗防破坏方法，造成了较大的经济损失，也使得出现被盗被破坏问题后虫害防治效果大打折扣。

参考李凯亮等[1]总结的联网型杀虫灯产品，对于具备防盗功能的产品[25-29]，当出现杀虫灯被盗被破坏时，有如下情况。

（1）整灯被盗。在整灯完整、功能正常的条件下，可通过定位判断是否被盗。若整灯被盗且功能正常，则被盗后可追回。

（2）零部件被盗。零部件被盗的情况下，系统仅显示相应模块故障，不能判别被盗情况。若蓄电池被盗，且无备用电源，则被盗时无法得知具体状况。

（3）整灯被破坏。所有零部件（包括蓄电池）被破坏，若无备用电源，则整灯被破坏时，无法得知具体状况。

（4）零部件被破坏。零部件被破坏的情况下，系统仅显示相应模块故障，不能判别被破坏情况。若蓄电池被破坏，且无备用电源，则被破坏时无法得知具体状况。

其中，太阳能杀虫灯被盗、被破坏和产生故障在系统中都只显示“故障”状态，这显然不利于管理维护人员判断杀虫灯的真实工作状态。

表1　杀虫灯盗窃破坏的相关文献、报道

Table 1 Related literatures and reports on theft and destruction of solar insecticidal lamps

时间	标题	相关文献、报道的表述
2001	频振式杀虫灯在园林害虫防治上的应用[3]	黑光灯上部件时常有丢失或被损坏
2003	频振式杀虫灯防治油松毛虫试验[4]	在护林的同时对杀虫灯加以管护，防止电源线脱落、杀虫灯的丢失损坏等
2004	频振式杀虫灯防治落叶松鞘蛾效果分析[5]	建立人与灯结合的管理制度，每人管理10台灯，负责开灯、闭灯、收虫、记录、分析、处理，并定期维护灯箱、擦拭灯管等，消除安全隐患，防止丢失、损坏
2010	宜川县苹果害虫发生现状与防控技术[6]	杀虫灯人为丢失、损坏现象严重
2011	新型杀虫灯诱杀玉米螟技术[7]	由于蓄电池可以随时安装和取下，所以夜间在屯外路边的秸秆垛诱虫时，偶尔会出现蓄电池丢失现象
2011	杀虫灯频遭“黑手”市政：盗走使用不当有害无益[8]	接连好几天发现安装在线杆上的多个灭蛾灯丢失，“白天发现灭蛾灯没有了，工作人员来安装上，第二天又丢了。”
2011	三亚政府免费安装千盏杀虫灯 两月后百盏遭破坏[9]	灭虫灯遭破坏，有的电池被偷，有的太阳能发电板被偷，有的电网和灯管被砸坏……据三亚有关部门统计，截至目前，约100多盏太阳能灭虫灯遭到破坏
2012	太阳能智能杀虫灯应用效果研究[10] 太阳能杀虫灯防治果园害虫试验[11]	在田间使用容易丢失，没有防盗功能，太阳能电池板容易被人为损坏
2013	广州市植保新技术新方法推广现状分析[12]	新技术推广应用过程中，后续维护和管理跟不上，常出现杀虫灯灯管易损耗、外壳易老化、接虫袋丢失，个别地方出现电线或杀虫灯被盗的情况

续表1

时间	标题	相关文献、报道的表述
2013—2014	积极争取公共财政扶持 扎实推进病虫害绿色防控[13] 1.65万盏杀虫灯让30万亩花生告别灌药历史[14]	香城镇2007年以来先后购置频振式杀虫灯4000盏，使用之初，由于以村为单位分散管理，责任利益不明确，丢失、坏损，甚至不正常安装使用的现象时有发生
2015	邹城市农作物病虫害专业化统防统治与绿色防控融合推进的实践及成效[15]	香城镇通过实施洪山流域生态农业示范区建设项目，先后购买杀虫灯3000盏、性诱捕器1万套、粘虫板50万块。使用之初，由于以村为单位分散管理，责任利益不明确，丢失损坏、安装使用不正常的现象时有发生
2015	浅析从化学防治到物理防治的转变——关于太阳能杀虫灯的应用[16]	由于太阳能杀虫灯价值较高，大田使用中容易丢失。这需要在使用中做好防盗工作，如加装防盗监控设施等，或者对产品作进一步改进，增加防盗功能
2016	太阳能杀虫灯对蔬菜害虫的诱杀效果[17]	应在农田适合位置用水泥固定安装太阳能杀虫灯，加强养护巡逻，严防偷盗
2017	物理诱虫灯成功控制虫害动了谁的奶酪[2]	自2007年，本团队为蒋家庄村民免费装的太阳灯杀虫灯或交流电杀虫灯，不断被破坏，前后损失十几万元
2018	花生病虫害全覆盖式绿色防控工作的实践与思考[18]	杀虫灯、诱捕器等植保产品使用之初是以村集体为单位分散管理，责任利益不明确，容易丢失、损坏、安装使用不当的情况时有发生
2018	文山州太阳能杀虫灯使用现状与问题及对策[19]	太阳能杀虫灯靠太阳能蓄电池蓄电，一般安装于田间距村庄住户比较远，普遍距地面比较近，没有防护罩，大人小孩容易接触到，太阳能蓄电池容易被损坏、盗走，我州部分县（市）蓄电池被盗事情频发。大大缩短了使用年限，而且维修起来花费较高，杀虫灯的后期管理维护困难重重
2018	太阳能诱虫灯对玉米害虫诱杀效果初探[20]	但单灯智能太阳能灯由于安装简易，较矮，易丢失
2018	农业生产切莫浪费了杀虫灯[21]	最初推广杀虫灯时，某580亩豇豆基地放了由农业部门免费送的15盏频振式杀虫灯，使用后效果奇好，可不到二三年时间，灯陆续坏了，无人修理，至今弃之不用
2020	太阳能杀虫灯在农业生产中的推广及应用[22]	对易损件要定期检查维护，防止人为损坏

如果可准确识别杀虫灯被盗被破坏的状况，管理维护人员则可以快速行动，降低可能产生的损失。而且，目前的产品防盗功能的实现有一个前提：灯具完整且功能正常。这意味着太阳能杀虫灯的防盗功能还有待提升。

此外，作者对物联网设备安全研究的现状进行了梳理，如表2所示。太阳能杀虫灯物联网和表2前三类场景特点都有共同之处，但是也存在不同；设备安全问题的应对对策也有不足之处，可结合前三类场景的应对对策完善现有太阳能杀虫灯的被盗被破坏的应对对策。

因此，可以对目前太阳能杀虫灯物联网节点加以改造设计，最终实现太阳能杀虫灯物联网节点更为完善的防盗防破坏功能。

本研究分析了太阳能杀虫灯设备在应用过程中被盗被破坏的情况，通过对太阳能杀虫灯内部硬件加以改造设计，并从太阳能杀虫灯外部考虑，增加辅助设备以开展应急措施。最后，结合硬件层面上的防盗防破坏设计，在软件层面上分析开展防盗防破坏研究过程中需要考虑的关键研究问题，并对未来太阳能杀虫灯物联网节点的防盗防破坏研究进行了展望。

本研究基于团队提出的太阳能杀虫灯物联网[1]，从两方面考虑太阳能杀虫灯的防盗防破坏的改造设计。

（1）从太阳能杀虫灯内部考虑。综合考虑成本、耗电量等因素，增加防盗防破坏的传感器，为具体零部件的被盗被破坏的评估提供数据支持，并在盗窃破坏状态出现后，警鸣器现场报警，尽可能降低损失。

（2）从太阳能杀虫灯外部考虑。设计一款机动性强的辅助设备——无人机杀虫灯，以便开展应急措施，保障物联网正常组网通信等基本功能，甚至为被盗被破坏案件的告破提供有效线索。

表2 物联网设备安全研究现状对比分析

Table 2 Comparative analysis of research status of Internet of Things equipment safety

场景描述	场景特点	设备安全问题类型举例	设备安全问题的特点	设备安全问题形成原因	应对对策	应对对策特点
与能量管理相关，如智能电网	户外场景，覆盖范围广，排查困难	电缆被盗[30]，输电线被盗[31,32]，智能电表被破坏[33-36]	随机性，易被破坏性，设备安全问题会造成局部影响	人为因素、自然因素	电路信号检测[30]，传感器检测[32]，行为分析[33,35,36]	快速响应并定位[30]，数据驱动[33-35]，用户用电隐私保护[36]
与具有计算能力的可移动设备相关，如智能手机，无人机，汽车，摩托车和共享单车等	可移动，便携，价值高，智能化	智能手机被盗[37-41]，无人机被破坏[42]，汽车被盗及组件被破坏[43-46]，摩托车组件被盗[47]，共享单车被盗[48]	针对性，随机性，设备安全问题会造成相应的设备财产损失	人为因素、自然因素	设备远程锁定[37,38,48]，RFID [39]，行为分析[40,46]，授权访问[41,42]，定位分析[43]，视频监控[44,45]	用户信息隐私保护[37,38,42]，无源检测[39]，用户使用习惯学习[40,46]，用户生物特征识别[41]，异常信号 [43-45,47]
场景内所有设备参与自组网，如文物、办公设备和智能家居等	关联性强，自组网，数量多	文物被盗[49]，办公设备被盗[50]，智能家居被破坏[51]	针对性，关联性，组网设备的状态会受到产生安全问题设备的影响，例如空调温度模块被破坏，造成智能开窗通风，这会增加室内被盗风险	人为因素、自然因素	RFID[49]，传感器检测[50]，行为分析[51]	无源检测[49]，被盗后追踪[50]，关联性分析[51]
太阳能杀虫灯物联网	户外场景，覆盖范围广，价值高，智能化，自组网，数量多	太阳能杀虫灯被盗、被破坏(详见表1)	针对性，随机性，关联性	人为因素、自然因素	视频监控[52-54]，定位防盗[25-29]	防盗警示，短信报警[25-29]

2 物联网节点防盗防破坏改造设计

2.1 改造设计需求

对于太阳能杀虫灯而言，任何时候都存在被盗被破坏的风险，需要满足不同时段对于被盗被破坏状况的监测需求来设计。

太阳能杀虫灯物联网节点的主要零部件包括：太阳能电池板、蓄电池、杀虫灯、通信模块（通信天线和无线设备）、控制电路、传感器模块以及安装支架等。如图2所示，增加太阳能电池板电压、电流传感器，监测太阳能电池板的电压、电流；蓄电池柜配锁，增加门控开关传感器，监测蓄电池柜是否异常开启；在支架内部布线以防电线从外部破坏；支架内置防盗防破坏系统硬件（通信用的备用供电模块、加速度传感器），通过金属支架保护硬件。考虑到不同零部件在不同时段的工作状态不同，防盗防破坏设计需要考虑各零部件的特点。

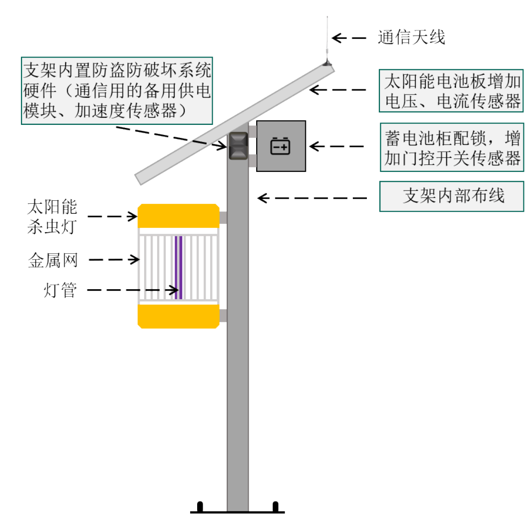


图2 太阳能杀虫灯改造设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of retrofit design of solar insecticidal lamp

（1）太阳能电池板。只有在有光照的条件下，太阳能板才有电流输出，所以在白天可以通过电流来判断太阳能电池板是否正常。但在夜间，无法通过电流来判断太阳能电池板是否正

常。而在太阳能电池板被盗被破坏的时候，固定太阳能电池板的支架通常会发生剧烈的晃动、倒地或者出现位置移动，因此可增加加速度传感器对破坏和盗取太阳能电池板的行为进行监测和判断。

（2）蓄电池。蓄电池白天通过太阳能电池板充电，同时给通信模块供电；夜间给太阳能杀虫灯供电，也给通信模块供电。不论白天、黑夜，这个过程都存在电流的变化。但是，如果该设备被盗被破坏，整个节点将无法正常工作，因此需要有应急备用电源以保障太阳能杀虫灯的通信功能。此外，目前的蓄电池通常放在上锁的蓄电池柜中，因此还需要有监测蓄电池柜打开的门控开关监测模块。

（3）太阳能杀虫灯。杀虫灯通过蓄电池供能，夜间开灯诱虫放电杀虫，这个过程存在电流的变化。但是白天不工作，无法通过电流来判断太阳能杀虫灯是否正常。而在太阳能杀虫灯被盗被破坏的时候，与太阳能杀虫灯相连接的支架通常会发生剧烈晃动、倒地或者出现位置移动，因此可增加加速度传感器对破坏和盗取太阳能杀虫灯的行为进行监测和判断。

目前通过GPRS模块进行太阳能杀虫灯防盗，只适用于整灯被盗，无法实现全天候地对所有零部件被盗被破坏状况进行监测。因此，在对太阳能杀虫灯进行改造设计过程中，需要增加上述提及的不同类型的传感器，以完善信息的采集，从而为准确判断被盗被破坏状况提供数据支持。

2.2 改造方案可行性分析

为获取更丰富的信息，除了增加不同类型的传感器之外，也可增加视频采集设备。表3对GPRS模块、视频采集模块，以及不同类型的传感器，从多个角度进行了对比，探索更适合太阳能杀虫灯物联网的应用场景。

其中，成本包括了单次投入和后续持续产生费用。GPRS模块和视频采集模块购买成本较其他传感器贵，且后续还存在持续增加的数据流量

表3 不同模块和传感器的性能对比

Table 3 Performances comparison of different modules and sensors

模块和传感器	GPRS模块	视频采集模块	电压、电流传感器	加速度传感器	门控开关
成本/CNY	≥40.0	≥100.0	6.0	16.5	0.4
持续工作能耗	高	高	低	低	低
模块安装工作量	低	中	低	低	低
模块被盗被破坏风险	低	中	低	低	低

注：“成本”数据来自网络

费用，这将大幅提高应用成本；同时这两个模块持续工作能耗很大，增加了蓄电池能量输出的负担。除了视频采集模块需要添加额外的支架以保证太阳能杀虫灯处在被监测范围内，其他模块和传感器都可以集成在电路板上，这也意味着视频采集模块相比于其他集成的传感器暴露在外，容易被盗被破坏。

综上所述，采用GPRS模块和视频采集模块会遇到成本持续增加的情况，视频采集模块也容易被盗被破坏。而选择集成其他传感器模块（电压、电流传感器、加速度传感器和门控开关传感器），总体价格更低，且不会增加额外费用，安全性也有保障，具有可行性。因此，本研究中选择电压、电流传感器、加速度传感器和门控开关传感器。

2.3 防盗防破坏系统总体设计

对太阳能杀虫灯硬件进行改造设计，完善防盗防破坏系统，如图3和图4所示。

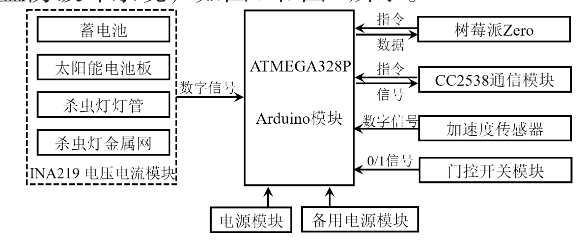


图3 防盗防破坏系统硬件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of system hardware for anti-theft and anti-destruction

其中，防盗防破坏系统通过型号为AR-MEGA328P的Arduino模块，接收来自电压电流模块、加速度传感器模块、门控开关模块、电源

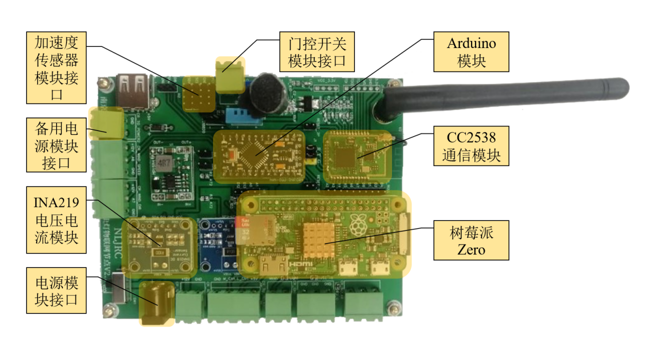


图4 防盗防破坏系统硬件实物图

Fig. 4 System hardware for anti-theft and anti-destruction

模块、备用电源模块的信号，并与树莓派Zero和CC2538通信模块交互，具体如下。

（1）四个电压电流模块用于监测蓄电池、太阳能电池板、杀虫灯灯管和杀虫灯金属网的电压电流情况，并以数字信号的方式传回Arduino模块。

（2）电源模块接入后，其能量可用于太阳能杀虫灯所有耗电模块的工作需求；备用电源模块在电源模块被切断后，给Arduino模块、通信模块应急供电。

（3）加速度传感器模块接入后，采集的信息以数字信号的方式传回Arduino模块。

（4）门控开关监测模块接入后，则以0/1信号的方式传回Arduino模块。

（5）CC2538通信模块接收来自Arduino模块的信号，并发出相应的指令以实现对Arduino模块的控制。

（6）树莓派Zero接收来自Arduino模块的数据信息，并发出相应的指令以实现对Arduino模块的控制。

2.4 功能可行性验证

杀虫灯防盗防破坏系统对相应的传感器功能的可行性进行验证，验证通过才能在太阳能杀虫灯上进行安装。通过一系列的测试，下面四种传感器均可正常运行，满足改造设计的需求。

（1）门控开关。门控开关开启或关闭，系统能够收到对应的高低电平信号。

（2）电压电流传感器。对于太阳能杀虫灯不同零部件，各自的电压电流传感器都可以输出实时电压电流变化，如“12.01 V，3.9 mA”。

（3）备用电源。切断蓄电池供电时，无线通信模块还可以正常工作，工作时长取决于电池容量，也不会因为切断蓄电池供电出现通信模块重启的情况。

（4）加速度传感器。当太阳能杀虫灯晃动时，加速度传感器能采集相应信号并上传系统。通过相应的模块获得数据信息，为太阳能杀虫灯状态的判断提供数据支撑。

3 基于无人机的防盗防破坏辅助设备设计

在增加了上面传感器之后，可获取更丰富的数据信息用于判断太阳能杀虫灯被盗被破坏的情况，但是面对“防盗防破坏”的需求仍存在不足。（1）在出现被盗被破坏情况后，不能提供更多的盗窃、破坏细节信息，破案难度较高，大概率不能追回被盗的太阳能杀虫灯零部件或者整灯，不能降低用户的损失；（2）在出现被盗被破坏情况后，没有可以快速补充节点的措施，关键节点可能被盗被破坏而导致网络通信瘫痪。同时，节点被破坏可能导致无法杀虫。因此，需要增加辅助设备以弥补上述不足。

3.1 目标需求

根据前文分析，对太阳能杀虫灯进行改造设计后，防盗防破坏系统可以采集更丰富的信息，可以更为准确地判断被盗被破坏状况。在出现被盗被破坏之前，用户希望能够降低被盗被破坏风险。在出现被盗被破坏情况后，用户希望能够追回被盗的零部件或者整灯，或者可以获取与破案相关的有价值的线索。同时，由于重新安装部署太阳能杀虫灯费时费力费钱，所以还需要可快速响应的辅助设备，进行应急杀虫。无人机作为机动性很强的设备，能够有效满足应急需求。

目前，无人机在农业中应用广泛，主要包括土壤监测[55,56]、测绘[57,58]、人工授粉[58,59]、作物表型[60,61]、精准农业[62-64]、灌溉[65,66]，农药喷洒、病虫害监测防治[67-69]，作物监测，以及植物

识别[70,71]。其中，关于无人机进行农药喷洒、病虫害监测防治的研究较多，在安全方面也有了一定的应用。例如警用无人机[72]和电力行业的巡检无人机[73]等。但截止目前，尚未有基于无人机开展农业生产设备的防盗防破坏研究，以保障设备安全。

综上，可以结合太阳能杀虫灯物联网场景的特点对无人机加以改造设计，以便在该场景中发挥更大的效果。因此，从杀虫以及防盗防破坏的角度出发，提出无人机杀虫灯。

3.2 无人机杀虫灯原型设计及可行性验证

3.2.1 结构组成

无人机杀虫灯主要由无人机及其电源、杀虫灯及其电源组成。无人机杀虫灯如图5所示。

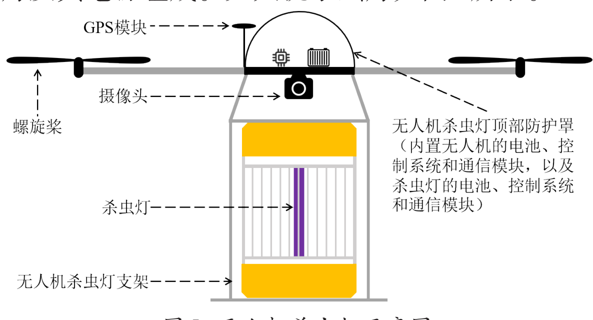


图5　无人机杀虫灯示意图

Fig. 5 Schematic diagram of unmanned aerial vehicle insecticidal lamp

（1）无人机。本研究使用定制无人机（品牌：datonhooya）[74]，具有5.0 kg的载重能力，装备了全球定位系统（Global Positioning System，GPS）、图传系统，可在2.4 GHz频段下无线通信。无人机底部支架根据杀虫灯尺寸加以定制，使得能够安装杀虫灯。同时依据关于杀虫灯杀虫放电会对旁边无线通信设备造成干扰的结果[75]，支架保持了无人机和杀虫灯的间距，避免无人机的通信模块以及杀虫灯的通信模块受到杀虫放电的干扰，引发设备通信问题。

（2）杀虫灯。设计采用神捕太阳能杀虫灯[76,77]，重量为3.5 kg。考虑到无人机的载重能力，采用小型锂电池给杀虫灯供电，因此，无人机杀虫灯中杀虫灯工作时长也和太阳能杀虫灯的工作时长不同。

（3）无人机和杀虫灯的通信。二者有各自的通信系统，彼此之间通过无线传感器网络通信。二者也有各自独立的电源：无人机采用的是高密度的锂电池（格氏ACE原厂锂聚合物动力锂电池16,000 mAh），而杀虫灯采用的是普通的锂电池（耐杰12 V锂电池8400 mAh）。对于无人机杀虫灯的两套通信系统，可以根据应用需求，设置其与太阳能杀虫灯物联网的节点通信方式。

3.2.2 载灯飞行测试及模拟杀虫测试

为验证无人机杀虫灯原型的可行性，从载灯飞行以及开灯杀虫时长两方面进行可行性测试。

（1）载灯飞行可行性测试。

测试目的：测试无人机能否载灯飞行。由于飞行时长、飞行距离与电池容量相关，而无人机杀虫灯飞行范围需要覆盖多少太阳能杀虫灯节点尚未确定，因此飞行时长暂不考虑。

测试方法：设计无人机支架，并将杀虫灯固定在无人机支架上，控制无人机杀虫灯飞行。

测试结果：如图6所示，无人机可以满足载灯飞行要求。但是支架底座的设计仍需要进一步优化，以提升起降稳定性。



图6　无人机杀虫灯飞行图

Fig. 6 Flying unmanned aerial vehicle insecticidal lamp

（2）开灯杀虫时长测试。目前所采用的神捕杀虫灯产品，在电量供应充足的条件下，每天夜间连续开灯杀虫时间设置为5 h。首先需要测试配备的锂电池是否能够坚持5 h的持续放电，保障能够支持一晚5 h的杀虫时间，从而保证无人机杀虫灯和太阳能杀虫灯在夜间开灯时长上的一致。

测试目的：测试无人机杀虫灯能否满足节点部署在野外，一晚持续5 h的开灯杀虫需求。

测试方法：为定量分析开灯杀虫时长，这里没有采用实地开灯放电杀虫的方式进行实验。而是依据模拟放电模块[78]，设置4次/s的放电频率，模拟放电杀虫；而每次杀虫是否有效，以在模拟放电模块旁边能否监测到电平跳变为准。因为在放电杀虫过程中，高压放电脉冲会引起一些元器件的电平跳变，可以认为真实的放电杀虫与电平跳变存在关联；更进一步，如果模拟放电模块工作过程中能够监测到电平跳变，可以认为模拟放电模块可以在一定程度上表征真实的放电杀虫过程。因此，通过模拟放电模块模拟放电杀虫具有一定的可行性，将模拟放电杀虫过程进行量化，便于定量分析。

测试结果：连续开灯放电工作5 h，还能够监测电平跳变，说明该锂电池可以满足无人机杀虫灯一晚上5 h的工作时长要求。

3.3 无人机杀虫灯与太阳能杀虫灯的对比

由于无人机杀虫灯是面向太阳能杀虫灯物联网的辅助设备，通过无人机杀虫灯与太阳能杀虫灯的对比分析（如表4所示），可以更加充分地了解无人机杀虫灯的应用特征，包括机动性强，可以短暂替代太阳能杀虫灯杀虫，并监测虫情信息，可以采集更丰富的图像视频信息。因此，无人机杀虫灯在太阳能杀虫灯物联网中的应用潜力巨大。

3.4 无人机杀虫灯的潜在应用

无人机杀虫灯作为太阳能杀虫灯物联网节点的辅助设备，还具有以下六方面应用。

（1）绿色防治。无人机杀虫灯作为一种新型农业设备，和太阳能杀虫灯一样，属于太阳能杀虫灯物联网节点，在田间部署的时候，可以开灯诱杀迁飞性害虫，因此，部署无人机杀虫灯也可以减少农药的施用。

（2）部署测试。通过无人机杀虫灯的预部署，短时间内在太阳能杀虫灯物联网中可以实现多种部署方案的实验测试，并根据测试结果选择最适合当地的部署方案。相比于固定部署太阳能杀虫灯进行实测而言，可以极大地降低部署工作量，并提升最终通信以及杀虫效果。

表4 无人机杀虫灯与太阳能杀虫灯的对比分析

Table 4 Comparison between unmanned aerial vehicle insecticidal lamp and solar insecticidal lamp

对比项	无人机杀虫灯	太阳能杀虫灯
杀虫覆盖范围	林区2～2.67 hm^2 丘陵及平原3.34～4 hm^2	林区2～2.67 hm^2 丘陵及平原3.34～4 hm^2
设备成本	8000元左右	2000元左右
是否固定	否，可高速移动	固定，拆装费时
供电方式	两种锂电池	单一蓄电池
能量来源	充电设备	太阳能
工作时长	较短，受限于电池容量	较长，可通过太阳能充电
被盗被破坏难易程度	容易	容易
智能化操控要求	高	中
作业环境要求	雨天可飞、不可杀虫，强风天不可飞	雨天不杀虫
通信协议频段	2.4 GHz	2.4 GHz
是否支持拍照、视频	是	否

（3）应急使用。如果遇到突发虫害，超出太阳能杀虫灯物联网节点的处理能力，或者环境条件不利于无人机施药或者其他方式施药（例如，风力条件不允许喷洒农药）。那么使用无人机杀虫灯协同太阳能杀虫灯物联网节点在虫害重点区域应急杀虫，可以减少农药的施用。如以下两种应用场景。

①如果遇到太阳能杀虫灯整灯被盗，无人机杀虫灯可以应急部署，暂时替代被盗节点，保障太阳能杀虫灯物联网节点的杀虫和通信功能，以便虫情信息和设备被盗信息的传输。同时派遣其他无人机杀虫灯对被盗太阳能杀虫灯进行追踪。

②如果遇到太阳能杀虫灯零部件被盗，无论无人机杀虫灯部署与否，无人机杀虫灯需根据零部件实际情况做出选择。例如，太阳能电池板在夜间被盗，则无需部署。

（4）诱虫深入。在太阳能杀虫灯物联网中，如果某一节点附近虫害密度较大，该节点的虫害防治压力较大，而其临近节点附近的虫害密度不

大，则可以通过无人机杀虫灯夜间开灯飞行而不杀虫，逐步就近吸引害虫到虫害密度低的区域，由对应区域内部署的节点杀灭相应的害虫，从而减少整个区域的农药施药量，并避免虫害防治压力较大区域节点能量的过度消耗。如果某地区尚未部署太阳能杀虫灯，但是监测到有大量迁飞性害虫，也可以通过无人机杀虫灯引诱的方式逐步吸引到部署了太阳能杀虫灯的区域进行杀虫，同时监测虫情信息。

（5）安全预警。如果太阳能杀虫灯或者无人机杀虫灯被盗被破坏，可通过无人机杀虫灯、太阳能杀虫灯物联网节点以及二者的协同，做出智能化决策，进行预警、追踪。也可以通过无人机杀虫灯不定期的、有针对性的巡检方式进行威慑，从而保障农业生产产品、设备不被盗或者被盗可追溯。

（6）组网监测。在虫情监测领域，雷达网的大尺度监测和高空灯、地面灯、性诱捕器的小尺度监测网的一体化运行，可以精准定位定量虫害的成虫迁移动态，并通过网络实时发布[79]。而无人机杀虫灯具备移动性强、监测防治于一体等特点，可以在监测网中有效减少人力物力的投入、协同地面灯（例如，智能化的太阳能杀虫灯物联网节点、高空灯、虫情测报灯等）采集虫情信息，为生产、科研工作提供有力支撑。

4 防盗防破坏的关键研究问题及展望

4.1 关键研究问题

在太阳能杀虫灯物联网场景中，对节点进行改造设计以及增加辅助设备无人机杀虫灯，为太阳能杀虫灯及无人机杀虫灯这些物联网设备的防盗防破坏提供了重要的硬件支持。但单纯地采集相关传感器的信息并不足以快速准确地判断被盗被破坏的情况。例如，传感器显示门控开关开启，加速度传感器响应，电压电流传感器正常。在这种情况下，仅仅从一个节点所采集的信息去考虑，不足以判断出该节点被盗，这可能是一种故障，并没有出现节点被盗被破坏的状况。因此，还需要协同其周围节点与该节点的通信状态，一起做出判断，以降低误报率。

因此，为更好地发挥设备的防盗防破坏功能，还需要从软件、硬件和外形结构设计层面考虑以下六个关键研究问题。

（1）优化设备防盗防破坏设计。从控制节点成本考虑，现有太阳能杀虫灯物联网节点仅配备了简易传感器用于防盗防破坏设计（例如，门控开关、加速度传感器和备用电源）。但就更好地保障太阳能杀虫灯安全而言，在硬件设计上可进一步增加GPS传感器（追踪定位）、多重安全冗余设计，以及在更多关键位置安装电压电流传感器监测设备运行状态。在外观设计上可采用安全系数更高的电力柜、在太阳能电池板支撑梁上增加防盗固定孔[80]等方式来完善太阳能杀虫灯的防盗结构。

（2）建立设备防盗防破坏判断规则。目前杀虫灯产品被盗大多基于设备定位信息，当设备定位信息发生变化则发出防盗警示。而对于采用多传感器，以多元信息融合为基础的太阳能杀虫灯防盗防破坏主题，目前尚未有相应的解决方案与策略。不同于工业设备防盗防破坏，太阳能杀虫灯具有部署范围广、部署密度低（2～4 hm^2/盏）、实时维护难的特点。此外，太阳能杀虫灯物联网节点的工作机制也是需要考虑的一个方面。因此，针对以上特点及工作机制，选择恰当的传感器，建立基于多源信息融合的盗窃与破坏判断规则库是亟需解决的关键研究问题。此外，研究盗窃、破坏与不同故障之间的因果关系也十分重要。

（3）快速准确判断设备是否被盗被破坏。依托现有太阳能杀虫灯物联网节点信息，设备被盗被破坏问题的快速准确判断还存在较大难度。而基于目前的故障诊断技术[75]，一些情况下，短时间内只能分析得出若干可能情况，还不能得出一个准确结论。如果等待人工前去识别或者花费较长时间进一步监测，可以准确判断，但也可能会造成较大的损失（例如设备被盗无法追回，设备被损坏无法追溯嫌疑人员）。因此，对于涉及

到设备被盗被破坏这类问题，要求能够快速准确地做出判断，这是首要考虑的重要研究工作。

（4）制定设备被盗被破坏应急措施。如果关键节点被盗被破坏，备用电源不足以支持完整功能（杀虫放电，虫情采集），整个太阳能杀虫灯物联网将无法正常工作。一方面，节点无法开灯杀虫，无法监测虫情，不利于后台对于实际虫情的实时把握。另一方面，备用电源不能监测部分零部件是否处在正常工作状态，也就是说，这部分零部件被盗被破坏后是无法及时被监测到的，这就导致设备面临更大的被盗被破坏风险。因此在判断被盗被破坏之后，需要快速开展应急措施。

应急措施首先要考虑快速部署，而太阳能杀虫灯的安装部署工作量决定了快速补充正常节点组网存在较大的难度，因而需要采用无人机杀虫灯进行应急部署，但是无人机杀虫灯的数量是有限的。因此，如何在更多太阳能杀虫灯节点失效的场景中完成应急部署，保障基本的虫情测报、通信功能也是非常重要的研究工作。

（5）进行设备被盗被破坏的预测与防控。对于太阳能杀虫灯物联网节点而言，由于部署位置偏僻等原因，节点被盗被破坏风险较高。根据太阳能杀虫灯被盗被破坏的历史数据，对于一个节点具体被盗被破坏问题进行分析，基于节点零部件被盗被破坏情况、节点位置、节点被盗后移动方向、节点最终追溯地点等信息，建立预测模型，结合无人机杀虫灯全天候、自动化、智能化的操作优势，进行倾向性巡检，加强风险等级较高节点的日常巡检；以及出现被盗被破坏后能够快速派遣追踪无人机开展相关线索的采集工作，最终提升安全风险显示较高的设备的防控水平。因此，对于设备被盗被破坏的预测与防控，降低设备被盗被破坏风险，也是极其重要的工作。

（6）优化计算以降低网络数据传输负荷。首先，在远程防盗防破坏监控过程中，盗窃破坏并非经常出现，日常监控结果趋于一致，实时传输监控结果会增加网络传输负荷；其次，太阳能杀虫灯部署地点较为特殊，容易受自然恶劣环境等因素影响而干扰加速度传感器信息采集结果，引起误判。针对这些问题，需开展相应的测试试验，一方面确定合适的通信频次，另一方面提高盗窃破坏状态判断的精确度。

4.2 展望

对太阳能杀虫灯开展防盗防破坏设计，并增加辅助设备无人机杀虫灯，在太阳能杀虫灯物联网的场景中，结合上述六个关键研究问题，可以有效降低设备被盗被破坏的风险，保障节点功能的正常运转，降低经济损失，推动相关技术的推广应用。如图7所示，在太阳能杀虫灯物联网场景中，可分别从网络层面和节点层面来分析。

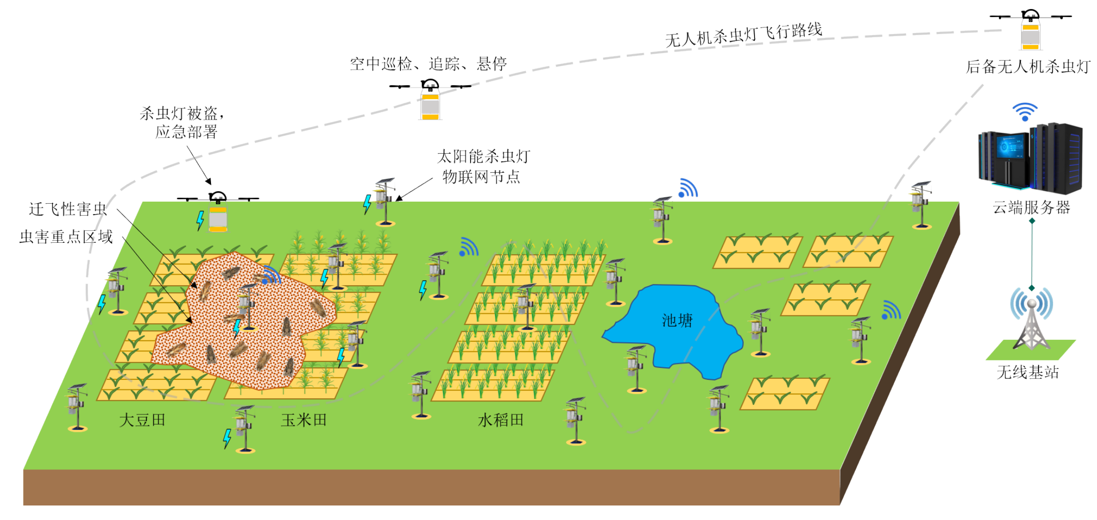


图7　防盗防破坏技术在太阳能杀虫灯物联网中的未来应用场景

Fig. 7 Prospect of anti-theft and anti-destruction technology in the scenario of Solar Insecticidal Lamps Internet of Things

（1）从网络层面来看，对于太阳能杀虫灯和无人机杀虫灯而言，经过硬件设计改造之后，太阳能杀虫灯被盗被破坏致使功能失效的情况下，物联网技术的应用可以实现节点被盗被破坏和故障的快速准确判断；而无人机和杀虫灯软硬件的高度集成，能够助力无人机杀虫灯和太阳能杀虫灯的协同工作，为组网节点提供一个“安全网”，最终为设备的正常运行提供安全保障。这不仅仅包括农业信息安全[81]，还包括农业设备安全。

（2）从节点层面来看，通过网络层面将任务信息落实到具体节点当中，无人机杀虫灯可以作为后备节点应急部署，开展放电杀虫作业。同时，可以根据需要执行巡检、追踪任务。随着防盗防破坏技术的不断升级完善，无人机杀虫灯作为太阳能杀虫灯物联网节点，不论地面部署还是空中飞行，都受到与之相适应的防盗防破坏技术的保护，从而降低所有节点的被盗被破坏风险。

在未来农业生产过程中，越来越多的物联网技术得到运用，无人化、智能化的智慧农业发展趋势逐步显现[82]；同时，这个过程需要部署大量农业生产设备，而本研究关于太阳能杀虫灯物联网节点的防盗防破坏技术也可以扩展应用在相应的农业物联网场景中，从软件、硬件和外形结构设计三方面共同保障农业生产设备的安全。

参考文献：

[1] 李凯亮, 舒磊, 黄凯, 等. 太阳能杀虫灯物联网研究现状与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2019, 1(3): 13-28.
LI K, SHU L, HUANG K, et al. Research and prospect of solar insecticidal lamps Internet of Things[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(3): 13-28.

[2] 蒋高明. 物理诱虫灯成功控制虫害动了谁的奶酪 [EB/OL]. (2017-05-30) [2021-03-10]. http://blog.sciencenet.cn/blog-475-1057890.html.

[3] 王贤玉, 翁晓梅. 频振式杀虫灯在园林害虫防治上的应用[J]. 植物保护, 2001(3): 47-48.
WANG X, WENG X. Application of frequency vibration insecticidal lamps in garden pest control[J]. Plant Protection, 2001(3): 47-48.

[4] 刘子忠. 频振式杀虫灯防治油松毛虫试验[J]. 山西林业, 2003(6): 32.
LIU Z. Experiment on controlling pine caterpillar with frequency vibration insecticidal lamps[J]. Forestry of Shanxi, 2003(6): 32.

[5] 刘子忠. 频振式杀虫灯防治落叶松鞘蛾效果分析[J]. 山西林业, 2004(2): 29.
LIU Z. Analysis on the effect of frequency vibration insecticidal lamp on controlling larch sheath moth[J]. Forestry of Shanxi, 2004(2): 29.

[6] 杜建林, 吴江波, 王丹. 宜川县苹果害虫发生现状与防控技术[J]. 陕西农业科学, 2010, 56(2): 229-231.
DU J, WU J, WANG D. Occurrence status and control techniques of apple pests in yichuan county[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2010, 56(2): 229-231.

[7] 李国奎, 李维艳, 孟维平. 新型杀虫灯诱杀玉米螟技术[J]. 中国园艺文摘, 2011, 27(4): 183-184.
LI G, LI W, MENG W. Trapping and killing corn borer with new insecticidal lamps[J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2011, 27(4): 183-184.

[8] 大众网. 杀虫灯频遭"黑手" 市政:盗走使用不当有害无益[EB/OL]. (2011-06-30) [2021-03-10] http://sd.dzwww.com/dongying/201106/t20110630_6442237.htm.

[9] 南国都市报. 三亚政府免费安装千盏杀虫灯 两月后百盏遭破坏[EB/OL]. (2011-12-26) [2021-03-10]. http://www.hinews.cn/news/system/2011/12/26/013866708.shtml.

[10] 齐蕴荣. 太阳能智能杀虫灯应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2012(2): 148.
QI Y. Study on application effect of solar intelligent insecticidal lamps[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012(2): 148.

[11] 林文忠, 任厚彬, 刘巍巍. 太阳能杀虫灯防治果园害虫试验[J]. 新农业, 2012(15): 25.
LIN W, REN H, LIU W. Experiment on controlling orchard pests with solar insecticidal lamps[J]. New Agriculture, 2012(15): 25.

[12] 林小军. 广州市植保新技术新方法推广现状分析[J]. 广东农业科学, 2013, 40(14): 103-104, 108.
LIN X. Analysis of insecticidal lamps promotion in guangzhou[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(14): 103-104, 108.

[13] 孔德生, 孙明海, 赵艳丽, 等. 积极争取公共财政扶持扎实推进病虫害绿色防控[J]. 中国植保导刊, 2013, 33(3): 63-65.
KONG D, SUN M, ZHAO Y, et al. Actively strive for public financial support and solidly promote green prevention and control of pests and diseases[J]. China Plant Protection, 2013, 33(3): 63-65.

[14] 农村大众. 1.65万盏杀虫灯让30万亩花生告别灌药历史[EB/OL]. (2014-08-05) [2021-03-10]. http://paper.dzwww.com/ncdz/content/20140805/Articel05002MT.htm.

[15] 孔德生, 孙明海, 朱晓明, 等. 邹城市农作物病虫害专业化统防统治与绿色防控融合推进的实践及成效[J]. 中国植保导刊, 2015, 35(4): 85-87.
KONG D, SUN M, ZHU X, et al. Practice and effect of integration of specialized unified control of crop diseases and pests and green prevention and control in Zoucheng city[J]. China Plant Protection, 2015, 35(4): 85-87.

[16] 王晓飞. 浅析从化学防治到物理防治的转变——关于太阳能杀虫灯的应用[J]. 科技资讯, 2015, 13(33): 226-227.
WANG X. Analysis on the transformation from chemical control to physical control—application of solar insecticidal lamps[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(33): 226-227.

[17] 云天海, 张磊. 太阳能杀虫灯对蔬菜害虫的诱杀效果[J]. 北方园艺, 2016(18): 118-121.
YUN T, ZHANG L. Trapping effect of solar energy pest-killing lamp on vegetable pests[J]. Northern Horticulture, 2016(18): 118-121.

[18] 闫硕, 孔德生, 赵艳丽, 等. 花生病虫害全覆盖式绿色防控工作的实践与思考[J]. 中国植保导刊, 2018, 38(1): 73-77.
YAN S, KONG D, ZHAO Y, et al. Practice and thinking of full coverage green prevention and control of peanut diseases and pests[J]. China Plant Protection, 2018, 38(1): 73-77.

[19] 赵大媛, 范俊珺, 梁兴格, 等. 文山州太阳能杀虫灯使用现状与问题及对策[J]. 农业与技术, 2018, 38(12): 7.
ZHAO D, FAN J, LIANG X, et al. Application status, problems and strategies of solar insecticidal lamps in Wenshanzhou[J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(12): 7.

[20] 张玉芳, 于凤艳. 太阳能诱虫灯对玉米害虫诱杀效果初探[J]. 农业与技术, 2018, 38(4): 36.
ZHANG Y, YU F. Preliminary study on trapping and killing effect of solar insecticidal lamps on corn pests[J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(4): 36.

[21] 王迪轩. 农业生产切莫浪费了杀虫灯[J]. 农药市场信息, 2018(22): 56-57.
WANG D. Insecticidal lamps must not be wasted in agricultural production[J]. Pesticide Market News, 2018(22): 56-57.

[22] 姜宝海, 赵铁伦, 贾生. 太阳能杀虫灯在农业生产中的推广及应用[J]. 农业机械, 2020(10): 85-88.
JIANG B, ZHAO T, JIA S. Promotion and application of solar insecticidal lamps in agricultural production[J]. Farm Machinery, 2020(10): 85-88.

[23] 王蔻, 高俏, 李玲玲, 等. 我国农用杀虫灯生产现状分析[J]. 华中昆虫研究, 2020, 16(00): 116-125.
WANG K, GAO Q, LI L, et al. Current development status of agricultural insect-pest light trap in China[J]. Insect Research in Central China, 2020, 16(00): 116-125.

[24] 江苏省公安厅. 有监控不代表“万事大吉”,监控摄像头也会被偷[EB/OL]. (2020-08-26) [2021-02-03]. http://www. bjyouth. com. cn/Bqb/20000412/GB/4216%5ED0412B1401.htm.

[25] 河南云飞科技发展有限公司, 智慧物联网杀虫灯 [EB/OL]. [2021-02-03]. http://www. tynpzs. com/cpzx/tynpzs/273.html.

[26] 浙江隆皓农林科技有限公司, 物联网太阳能杀虫灯[EB/OL]. [2021-02-03]. http://www. dwdds. com/product/283.html.

[27] 上海飞欣环保科技有限公司, 物联网太阳能杀虫灯[EB/OL]. [2021-02-03]. http://www. xxscled. cn/product/20180228161404.html.

[28] 河南赛兰仪器设备制造有限公司, 智能物联网太阳能杀虫灯[EB/OL]. [2021-02-03]. http://www. slyqa. com/a/cp/fz/tynscd/473.html.

[29] 常州金禾新能源科技有限公司, 物联网杀虫灯[EB/OL]. [2021-02-03]. http://www.jinhexny.com/news/27.html.

[30] LENCWE M, CHOWDHURY S, OLWAL T. Detection of underground power cable theft: Strategies and methods[C]// 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica. Piscataway, New York, USA: IEEE, 2018: 1-9.

[31] CHRISTOPHER A, SWAMINATHAN G, SUBRAMANIAN M, et al. Distribution line monitoring system for the detection of power theft using power line communication[C]// 2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON). Piscataway, New York, USA: IEEE, 2014: 55-60.

[32] PATIL Y, SANKPAL S. EGSP: Enhanced grid sensor placement algorithm for energy theft detection in smart grids[C]// 2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT). Piscataway, New York, USA: IEEE, 2019: 1-5.

[33] GAO Y, FOGGO B, YU N. A physically inspired data-driven model for electricity theft detection with smart meter data[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(9): 5076-5088.

[34] ZHENG Z, YANG Y, NIU X, et al. Wide and deep convolutional neural networks for electricity-theft detection to secure smart grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(4): 1606-1615.

[35] ZHENG K, CHEN Q, WANG Y, et al. A novel combined data-driven approach for electricity theft detection[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1809-1819.

[36] SALINAS S, LI P. Privacy-preserving energy theft detection in microgrids: A state estimation approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 883-894.
[37] GAO Y, ZHOU C, SHANG D. A smart phone anti-theft solution based on locking card of mobile phone[C]// 2011 International Conference on Computational and Information Sciences. Piscataway, New York, USA: IEEE, 2011: 971-974.
[38] CHANG S, LU T, SONG H. SmartDog: Real-time detection of smartphone theft[C]// 2016 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData). Piscataway, New York, USA: IEEE, 2016: 223-228.
[39] HUSSAIN M, LU L, GAO S. An RFID based smartphone proximity absence alert system[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(5): 1246-1257.
[40] YANG L, GUO Y, DING X, et al. Unlocking smart phone through handwaving biometrics[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(5): 1044-1055.
[41] REN Y, CHEN Y, CHUAH M, et al. User verification leveraging gait recognition for smartphone enabled mobile healthcare systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(9): 1961-1974.
[42] AFMAN J, CIARLETTA L, FERON E, et al. Towards a new paradigm of UAV safety[EB/OL]. arXiv preprint arXiv:1803.09026, 2018.
[43] HU J, LI J, LI G. Automobile anti-theft system based on GSM and GPS module[C]// 2012 Fifth International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems. Piscataway, New York, USA: IEEE, 2012: 199-201.
[44] SREEDEVI A, NAIR B. Image processing based real time vehicle theft detection and prevention system[C]// 2011 International Conference on Process Automation, Control and Computing. Piscataway, New York, USA: IEEE, 2011: 1-6.
[45] MOHANASUNDARAM S, KRISHNAN V, MADHUBALA V. Vehicle theft tracking, detecting and locking system using open cv[C]// 2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS). Piscataway, New York, USA: IEEE, 2019: 1075-1078.
[46] KWAK B, HAN M, KIM H. Driver identification based on wavelet transform using driving patterns[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17 (4): 2400-2410.
[47] ARTONO B, LESTARININGSIH T, YUDHA R, et al. Motorcycle security system using SMS warning and GPS tracking[J]. Journal of Robotics and Control (JRC), 2020, 1(5): 150-155.
[48] ZALA D. Bike security with theft prevention[C]// 2018 3rd International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). Piscataway, New York, USA: IEEE, 2018: 640-643.
[49] LIU Z, WANG M, QI S, et al. Study on the anti-theft technology of museum cultural relics based on internet of things[J]. IEEE Access, 2019, 7: 111387-111395.
[50] HAN Y, CHEN Z, GUO T. Design of equipment anti-theft tracker based on wireless sensor network[C]// 2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS). Piscataway, New York, USA: IEEE, 2017: 1-5.
[51] DING W, HU H. On the safety of iot device physical interaction control[C]// In Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS'18). New York, NY, USA: ACM, 2018: 832-846.
[52] 金炜, 项新建. 基于Zigbee/GPRS的杀虫灯监控系统的设计[J]. 浙江科技学院学报, 2017, 29(6): 433-441.
JIN W, XIANG X. Design of insecticidal lamp monitoring system based on zigbee and gprs technology[J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2017, 29(6): 433-441.
[53] 马仟, 田茂, 唐文龙. 基于WSN的分布式太阳能杀虫灯远程控制系统研究与设计[J]. 物联网技术, 2017, 7 (2): 77-79, 83.
MA Q, TIAN M, TANG W. Research and design of distributed remote control system of solar insecticidal lamps based on WSN[J]. Internet of Things Technologies, 2017, 7(2): 77-79, 83.
[54] 朱城. 基于物联网技术的植保杀虫灯智能管理系统研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2019.
ZHU C. Research on intelligent management system of plant protection insecticide lamp based on internet of things technology[D]. Hefei: Anhui University, 2019.
[55] POPESCU D, STOICAN F, STAMATESCU G, et al. A survey of collaborative UAV-WSN systems for efficient monitoring[J]. Sensors, 2019, 19(21): 1-40.
[56] AYAZ M, AMMAD-UDDIN M, SHARIF Z, et al. Internet-of-things (IOT)-based smart agriculture toward making the fields talk[J]. IEEE Access, 2019, 7: 129551-129583.
[57] Michael P A. International climate protection[M]. Cham: Springer International Publishing, 2019: 93-97.
[58] JEONGEUN K, SEUNGWON K, CHANYOUNG J, et al. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applica-

tions[J]. IEEE Access, 2019, 7: 105100-105115.

[59] MADDIKUNTA P K R, HAKAK S, ALAZAB M, et al. Unmanned aerial vehicles in smart agriculture: Applications, requirements, and challenges[J]. IEEE Sensors Journal, 2021: 1-12.

[60] BOURSIANIS A D, PAPADOPOULOU M S, DIAMANTOULAKIS P, et al. Internet of things (IOT) and agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review[J]. Internet of Things, 2020. (in Press)

[61] 沈宝国, 范月圆, 杨妍, 等. 基于作物表型信息获取的多旋翼飞行器应用研究综述[J]. 装备制造技术, 2019 (8): 10-12, 29.
SHEN B, FAN Y, YANG Y, et al. Research of multi-rotor aircraft application based on crop phenotyping acquisition[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2019(8): 10-12, 29.

[62] ALZAHRANI B, OUBBATI O S, BARNAWI A, et al. UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2020, 166: 1-44.

[63] 宋庆恒, 郑福春. 基于无人机的物联网无线通信的潜力与方法[J]. 物联网学报, 2019, 3(1): 82-89.
SONG Q, ZHENG F. Potential and methods of wireless communications for Internet of things based on UAV[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3 (1): 82-89.

[64] 贾慧, 杨柳, 郑景飚. 无人机遥感技术在森林资源调查中的应用研究进展[J]. 浙江林业科技, 2018, 38(4): 89-97.
JIA H, YANG L, ZHENG J. Advances of uav remote sensing applied in forest resources investigation[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2018, 38(4): 89-97.

[65] 唐鹏飞, 田晶. 无人机在未来农机中的应用及发展趋势[J]. 南方农机, 2020, 51(16): 53-54.
TANG P, TIAN J. Application and development of uav in future agricultural machinery[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2020, 51(16): 53-54.

[66] 严浙平, 杨泽文, 王璐, 等. 马尔科夫理论在无人系统中的研究现状[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(6): 9-18.
YAN Z, YANG Z, WANG L, et al. Research status of markov theory in unmanned systems[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(6): 9-18.

[67] 肖强, 王志博, 郭华伟. 植保无人机在茶园的应用与发展前景[J]. 中国茶叶, 2019, 41(4): 16-18.
XIAO Q, WANG Z, GUO H. Application and development prospect of plant protection UAV in tea garden[J]. China Tea, 2019, 41(4): 16-18.

[68] 何道敬, 杜晓, 乔银荣, 等. 无人机信息安全研究综述[J]. 计算机学报, 2019, 42(5): 1076-1094.
HE D, DU X, QIAO Y, et al. A survey on cyber security of unmanned aerial vehicles[J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(5): 1076-1094.

[69] 何勇, 吴剑坚, 方慧, 等. 植保无人机雾滴沉积效果研究综述[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2018, 44(4): 392-398.
HE Y, WU J, FANG H, et al. Research on deposition effect of droplets based on plant protection unmanned aerial vehicle: A review[J]. Journal of Zhejiang University(Agriculture and Life Sciences), 2018, 44(4): 392-398.

[70] 陈鹏飞. 无人机在农业中的应用现状与展望[J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2018, 44(4): 399-406.
CHEN P. Applications and trends of unmanned aerial vehicle in agriculture[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2018, 44(4): 399-406.

[71] 付婷婷, 邓永卓, 韩志江. 无人机在现代农业生产中的应用[J]. 天津农林科技, 2017(4): 14-15.
FU T, DENG Y, HAN Z. Application of uav in modern agricultural production[J]. Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forestry, 2017(4): 14-15.

[72] 尚杨, 刘润南, 文雯. 警用无人机实际应用及存在的问题分析[J]. 无线互联科技, 2020, 17(10): 15-17, 29.
SHANG Y, LIU R, WEN W. Practical application and existing problem analysis of police unmanned aerial vehicle[J]. Wireless Internet Technology, 2020, 17(10): 15-17, 29.

[73] 隋宇, 宁平凡, 牛萍娟, 等. 面向架空输电线路的挂载无人机电力巡检技术研究综述[J]. 电网技术, 1-15.
SUI Y, NING P, NIU P, et al. Review on mounted uav for transmission line inspection[J]. Power System Technology, 1-15.

[74] Datonhooya, 大载重无人机[EB/OL]. [2021-02-03]. https://item.taobao.com/item.htm?id=616035356201.

[75] 杨星, 舒磊, 黄凯, 等. 太阳能杀虫灯物联网故障诊断特征分析及潜在挑战[J]. 智慧农业(中英文), 2020, 2 (2): 11-27.
YANG X, SHU L, HUANG K, et al. Characteristics analysis and challenges for fault diagnosis in solar insecticidal lamps Internet of Things[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(2): 11-27.

[76] SHUANG K, LI K, SHU L, et al. High voltage discharge exhibits severe effect on zigbee-based device in solar insecticidal lamps Internet of Things[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(6): 140-145.

[77] 神捕, 太阳能杀虫灯[EB/OL]. [2021-02-03]. https://item.taobao.com/item.htm?id=563277494013.

[78] HUANG K, LI K, SHU L, et al. Demo abstract: High voltage discharge exhibits severe effect on zigbee-

based device in solar insecticidal lamps Internet of Things[C]// IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS). Piscataway, New York, USA: IEEE, 2020: 1266-1267.

[79] 人民日报海外版, 虫口夺粮,昆虫雷达助力战“妖蛾”[EB/OL]. (2020-08-17) [2021-02-03]. http://paper.people. com. cn/rmrbhwb/html/2020-08/17/content_2003608.htm.

[80] 邢丽芬, 樊丰继, 陈启聪, 等. 一种太阳能电池板的防盗定位结构: 中国, CN201927618U[P]. 2011-08-10.

XING L, FAN F, CHEN Q, et al. Anti-theft positioning structure of solar panel: China, CN201927618U[P]. 2011-08-10.

[81] YANG X, SHU L, CHEN J, et al. A Survey on smart agriculture development modes, technologies, and security and privacy challenges[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(2): 273-302.

[82] FRIHA O, FERRAG M A, SHU L, et al. Internet of things for the future of smart agriculture: Comprehensive survey of emerging technologies[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2021, 8(4): 718-752.

Design and Prospect for Anti-theft and Anti-destruction of Nodes in Solar Insecticidal Lamps Internet of Things

HUANG Kai[1,2], SHU Lei[2,3*], LI Kailiang[2], YANG Xing[2], ZHU Yan[1], WANG Xiaochan[4], SU Qin[2]

（1. *National Engineering and Technology Center for Information Agriculture*, *Nanjing* 210095, *China*; 2. *College of Artificial Intelligence*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*; 3. *School of Engineering*, *University of Lincoln*, *Lincoln*, *LN67TS*, *U. K.* ; 4. *College of Engineering, Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*）

Abstract: Solar insecticidal lamps (SILs) are widely used in agriculture for the purpose of effectively controlling pests and reducing pesticide dosage. With the increasing deployment of SILs, there are more and more reports about theft and destruction of SILs, seriously affecting the pest control effect and leading to great economic losses. Unfortunately, many efforts remain unsuccessful, since people can destruct the components of SIL in part but not steal the whole SIL, which cannot be detected by GPRS module or can only be labeled as a fault of component. To realize the broader effect of anti-theft and anti-destruction in the scenario of Solar Insecticidal Lamps Internet of Things (SIL-IoTs), there were two types of designs which would enable substantial improvements. On one hand, SIL was reformed and designed to obtain more information from different kinds of sensors and increase the difficulty of theft and destruction of SILs. Four modules were equipped including gated switch, voltage and current module, emergency power module, acceleration sensor module. Gated switch was used to judge whether the gate of power was open or closed. Voltage and current module of battery, solar panel, lamp, and metal mesh were used to judge whether the components were stolen or destructed. Emergency power module was used for communication module after the battery being stolen. Acceleration sensor module was used to judge whether the SIL was shaking by stealer. On the other hand, the auxiliary equipment of SIL, i.e., unmanned aerial vehicle insecticidal lamp (UAV-IL), was put forward for emergency applications after theft and destruction of SIL, e.g., deployment, tracking, patrol inspection, and so on. Through the above-mentioned hardware design and application of UAV-IL, more information from different kinds of sensors could be obtained to make judgements about the situation of theft and destruction. However, considering the short occurrence time of theft and destruction, the design was not enough to realize fast and accurate judgments. Therefore, six key research issues in the design of internal hardware, software algorithm and appearance structure design level were discussed, including 1) optimal design of anti-theft and anti-destruction of SILs; 2) establishment of anti-theft and anti-destruction judgment rules of SILs; 3) fast and accurate judgments of theft and destruction of SILs; 4) emergency measures after theft and destruction of SILs; and 5) prediction and prevention of theft and destruction of SILs; 6) optimal calculation to reduce the load of network data transmission. The anti-theft and anti-destruction have crucial roles in equipment safety, which can be extended to various agricultural applications.

Key words: solar insecticidal lamp; anti-theft and anti-destruction; unmanned aerial vehicle insecticidal lamp; agricultural Internet of Things; node